Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 6, Feb.-Mar. 2025, p. 699-712

Effects of Different Levels of Selenium in the Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture

N. Lotfi[1], Sh. Kiani[2*], H.R. Motaghian[2]

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: shahram.kiani@sku.ac.ir)

Received:	28-05-2024	**How to cite this article:** Lotfi, N., Kiani, Sh., & Motaghian, H.R. (2025). Effects of different levels of selenium in the nutrient solution on the growth and nitrate accumulation of red French lettuce in soilless culture. *Journal of Water and Soil, 38*(6), 699-712. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88287.1411
Revised:	26-11-2024	
Accepted:	27-11-2024	
Available Online:	27-11-2024	

Introduction

Selenium (Se) is one of the beneficial elements for plants, which is usually not supplied in the nutrient solutions used in soilless cultures. It is an essential element for both humans and animals. Application of Se at low concentrations has a positive effect on the growth and quality indices of plants. Nitrate accumulation in leafy vegetables poses threaten to human health. Leafy vegetables such as lettuce (*Lactuca sativa* L.) contain high levels of nitrate. According to the results of some researches, application of Se in the nutrient solutions can decrease nitrate accumulation in vegetables. However, the optimum concentration of Se in the nutrient solution for lettuce production in hydroponic culture is still not clear. This experiment was conducted to elucidate the effect of different levels of Se in the nutrient solution on the growth indices, yield, and nitrate accumulation of red French lettuce (cv. *Lolla Rossa*) in soilless culture.

Materials and Methods

A perlite culture experiment, using completely randomized design, was carried out with seven levels of Se in the nutrient solution (0, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 and 20 µmol L^{-1}) with four replications in the research greenhouse of Shahrekord University. Lettuce seedlings were grown in 1.7 L plastic pots (one plant per pot) containing perlite with size of 0.5-5 mm and were manually fertigated with the nutrient solutions on a daily basis. Different concentrations of Se were applied as sodium selenate ($Na_2SeO_4.2H_2O$) in the nutrient solution (Domingues *et al.*, pH= 5.4±0.1, EC=1.36-1.41dS m^{-1}). After four weeks, lettuce plants were harvested and the fresh weights of shoots and roots were measured. Plant growth indices consisting of leaf number, leaf length, leaf width, plant height, plant diameter, leaf chlorophyll index, and leaf total soluble solids were determined. In one bush in each treatment, the leaves were separated as 1st to 10th outer leaves and other inner leaves. The leaves were dried in an oven at 70 °C and were ground. Nitrate concentrations in outer and inner leaves were measured calorimetrically using a spectrophotometer at a wavelength of 410 nm. Shoots Se concentration was determined with ICP-MS after wet digestion of samples with HNO_3 and H_2O_2. Analysis of variance was done using SAS software and means comparison was conducted using the least significant difference test at 0.05 probability level.

Results and Discussion

The results indicated that application of Se in the nutrient solution had not significant effect on the lettuce growth indices including of leaf length, leaf width and leaf number. Application of 10 µmol L^{-1} of Se in the nutrient solution led to significant decrease of plant height in comparison with control, but plant diameter increased with application of Se in the nutrient solution. The highest plant diameter was observed in 10 µmol L^{-1} of Se treatment. The highest and the lowest shoot fresh weight were obtained under 0 and 1 µmol L^{-1} of Se in the nutrient solution,

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88287.1411

respectively. Application of 1 μmol L^{-1} Se increased shoots fresh weight by 22% comparing to the control. Shoot Se concentration was increased with application of Se in the nutrient solution. The highest concentration of Se in shoots (15 mg kg^{-1} dry matter) was observed at the rate of 20 μmol L^{-1} of Se in the nutrient solution. The amount of Se accumulated in the plant tissue is important in biofortification programs. The results showed that application of Se in the nutrient solution (with the exception of 1 μmol L^{-1} of Se) led to significant decrease in the nitrate concentration of roots, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce. The lowest nitrate concentration in all leaves of lettuce (2095 mg kg^{-1} fresh weight) was obtained in plants nourished with 0.5 μmol L^{-1} of Se in the nutrient solution. Compared with control (0 μmol L^{-1} of Se), nitrate concentration in all leaves for 0.5 μmol L^{-1} of Se treatment was decreased 28%. Selenium has a positive function on decreasing nitrate accumulation in plants *via* regulating the transport of nitrate and enhancing activities of nitrogen metabolism enzymes.

Conclusion

According to our results, application of Se decreased nitrate concentration in lettuce plants. Therefore, application of Se in the nutrient solution at the rate of 0.5 μmol L^{-1} is suggested for red French lettuce production in hydroponic culture under the conditions of the present study.

Keywords: Beneficial elements, Hydroponic, Leafy vegetables, Methemoglobinemia

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۳، ص. ۷۱۲-۶۹۹

تأثیر سطوح مختلف سلنیم محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک

نرگس لطفی[۱]- شهرام کیانی[۲]*- حمیدرضا متقیان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

چکیده

سلنیم جزو عناصر مفید برای گیاهان بوده که معمولا در محلول‌های غذایی در کشت‌های هیدروپونیک مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این پژوهش به منظور بررسی اثر سطوح مختلف سلنیم در محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی و تجمع نیترات در کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا (*Lactuca sativa* L. cv. *Lolla Rossa*) انجام شد. این آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت غلظت سلنیم در محلول غذایی (صفر، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر از منبع سلنات سدیم) در چهار تکرار به‌صورت کشت بدون خاک در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. نتایج نشان داد کاربرد سطوح مختلف سلنیم تأثیر معناداری بر شاخص‌های رشدی کاهو از قبیل طول برگ، عرض برگ و تعداد برگ در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم نداشت. اگرچه کاربرد سلنیم با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار ارتفاع گیاه در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد؛ اما قطر گیاه با کاربرد سلنیم افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین قطر بوته با کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم حاصل شد. کاربرد سلنیم با غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار شاخص سبزینگی کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. بر مبنای نتایج حاصله کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو شد که در مقایسه با محلول غذایی فاقد سلنیم ۲۲ درصد افزایش یافت. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر به‌ترتیب منجر به تجمع ۷/۴ و ۱۵ میلی‌گرم سلنیم بر کیلوگرم ماده خشک در شاخساره کاهو شد که از لحاظ غنی‌سازی این محصول با سلنیم دارای اهمیت زیادی است. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو در گیاهان تغذیه شده با ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد که در مقایسه با عدم مصرف سلنیم به‌طور معنادارای کاهش یافت. بر اساس غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر در محلول غذایی برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک در شرایط این پژوهش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سبزی‌های برگی، عناصر مفید، متهموگلوبینیمیا، هیدروپونیک

مقدمه

سلنیم یک عنصر غذایی مفید برای گیاهان عالی است (Marschner, 1995) که معمولا در ترکیب شیمیایی محلول‌های غذایی در کشت‌های بدون خاک مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. پژوهش‌های انجام شده حاکی است کاربرد این عنصر در غلظت‌های کم اثرات مثبتی بر شاخص‌های رشدی و کیفی گیاه داشته است. خادمی آستانه و همکاران (Khademi Astaneh *et al.*, 2015) گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم در محلول غذایی تا ۸ میلی‌گرم بر لیتر عملکرد و محتوای کلروفیل برگ‌ها در کلم تکمه‌ای

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: shahram.kiani@sku.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88287.1411

(*Brassica oleracea*) افزایش یافته، اما با افزایش بیشـــتر غلظت سـلنیم، عملکرد کاهش و نشت الکترولیت[1] از برگ‌های جوان افزایش یافت. بذل و همکاران (Bazl *et al.*, 2017) گزارش کردند بالاترین وزن تازه و قطر سوخ در تیمار ۱۲۸ میلی‌گرم بر لیتر سولفات در ترکیب با غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر سـلنات مشاهده شد. آنها عنوان کردند در تمامی غلظت‌های سـولفات همزمان با افزایش سـطح سـلنات ارتفاع بلنـدترین برگ در پیـاز کاهش یافت و با افزایش غلظت ســـلنات در تمامی سـطوح سـولفات، تجمع سـلنیم در سوخ بیشتر شد. عامریان و همکـاران (Amerian *et al.*, 2018) بیان داشـــتند کاربرد همزمان ســـلنیم همراه بـا نیتروژن نقش بســـیـار مهمی در بهبود برخی از خصـوصـیات رشـدی و بیوشـیمیایی دانهال پیاز در کشت بدون خاک داشت که نشان‌دهنده تأثیر مثبت هر دو عنصر بر افزایش میزان سنتز کلروفیل و در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز و تثبیت کربن در گیاه بود. هائیرلاک-نواک (Hawrylak-Nowak, 2008a) گزارش کرد کاربرد ۵ میکرمول بر لیتر سـلنیم در محلول غذایی منجر به تحریک رشـد و طویل شــدن ریشـــه در گیاهچه‌های ذرت شـــد در حالی‌که کاربرد غلظت‌های بیشتر سلنیم (۵۰ و ۱۰۰ میکرمول بر لیتر) منجر به کاهش شدید تجمع ماده خشک در گیاه شد. او عنوان کرد اختلالات رشدی و کاهش زیسـت توده گیاهی در حضـور غلظت زیاد سلنیم ممکن است ناشـی از اختلال در تعادل عناصـر غذایی، تجمع مقادیر زیاد کلسیم و فسـفر در بخش هوایی باشـد. راموس و همکاران (Ramos *et al.*, 2010) بیان کردند کاربرد ۸ میکرومول بر لیتر سـلنیم از منبع سـلنات سـدیم و ۴ میکرومول بر لیتر از منبع سـلنیت سدیم برای دستیابی به بیشترین وزن خشک بخش هوایی کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک قابل توصـیه اسـت. هائیرلاک-نواک (Hawrylak-Nowak, 2013) بیان کرد اسـتفاده از ۱۵ میکرومولار سـلنیم به‌شـکل سـلنیت باعث کاهش زیسـت‌توده و تشـدید فرآیندهای آنتی‌اکسـیدانی در بافت‌های کاهو در کشـت هیدروپونیک شـد؛ به‌طور کلی نتایج نشـان داد کاربرد سلنیت یا سلنات در غلظت‌های کمتر از ۱۵ میکرومولار می‌تواند برای تقویت و رشـد بهتر گیاه کاهو اسـتفاده شـود. منیتونگ و همکاران (Maneetong *et al.*, 2013) بیـان کردنـد کاربرد ۴۵ میکروگرم بر میلی‌لیتر ســلنیم در محلول غذایی ســرعت رشـد کلم پیچ قمری را کاهش داد. با این‌حال، غلظت کل ســلنیم در گیاه، در تمام تیمارهای حاوی سـلنیم بیشـتر از تیمار شاهد بود. بیشترین غلظت سلنیم تجمع یافته در گیاه در تیمار حاوی ۳۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر مشـاهده شـد. بیان و همکاران (Bian *et al.*, 2020) با مصـرف سـلنیم در محلول غذایی از صفر تا ۲۰ میکرومول بر لیتر عنوان کردند بیشترین وزن تازه و خشـک بخش هوایی و ریشـه کاهو با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنات سدیم حاصل شد.

سبزی‌های برگی از قبیل کاهو تجمع‌دهنده نیترات هستند. نیترات در بدن انسـان به نیتریت احیا شده و پس از جذب باعث ایجاد عارضه متهموگلوبینیما می‌شود که این مسئله باعث ایجاد سندروم نوزاد کبود در نوزادان[2] می‌گردد. همچنین نیتریت با ترکیبات نیتروساتابل از قبیل آمیدها و آمین‌ها در معده انسان واکنش داده و منجر به تولید ترکیبات ان- نیتروزو می‌گردد (Santamaria, 2006). برخی از این ترکیبـات مثل نیتروزآمین سـرطان‌زای قوی در گونه‌های حیوانی بوده و بنابراین می‌توانند منجر به بروز ســرطان در انســان شــوند (Risch *et al.*, 1985). نتایج تحقیقات حاکی از آن است که کاربرد سلنیم در محلول غذایی منجر به کاهش تجمع نیترات در سبزی‌ها شده است. در همین زمینه جلالی و صالحی چگنی (Jalali & Salehi Chegeni, 2020) گزارش دادند کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت ۵ میکرومول بر لیتر باعث کاهش غلظت نیترات در هر دو گیاه اســفناج و کاهو شــد. کاربرد سلنیم از طریق افزایش هدایت روزنه‌ای و میزان کلروفیل باعث افزایش ظرفیت فتوســنتزی گیاه شــد. آنها بیان داشــتند ســلنیم تأثیر مثبتی بر کاهش تجمع نیترات در هر دو گیاه از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌هـای دخیل در متابولیســـم نیترات داشـــت. ریوس و همکاران (Rios *et al.*, 2010) گزارش دادند که ســلنیم ســبب کاهش تجمع نیترات در کاهو به‌واسطه‌ی افزایش فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز، نیتریت ردوکتاز، گلوتامین ســـنتتاز و گلوتامات ســـنتاز و متابولیســـم نیتروژن شــد. لی و همکـاران (Lei *et al.*, 2018) دریافتند کاربرد سـلنیم به‌طور قابل توجهی سبب کاهش تجمع نیترات در کاهو شده و کمترین میزان تجمع نیترات تحت تأثیر غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر سـلنیم از منبع سـلنیت سـدیم به‌دسـت آمد. آنها بیان کردند سلنیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر متابولیســـم نیتروژن عملکرد مثبتی در کاهش تجمع نیترات در کاهو داشـت. همچنین اسـتفاده از سـلنیم سبب افزایش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بازده تعرق و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی کاهو شد. بیان و همکاران (Bian *et al.*, 2020) گزارش دادنـد کمترین میزان نیترات و بالاترین زیســـت‌توده کاهو در هر دو تیمار حاوی سـلنیت و سـلنات با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر در کشـت هیدروپونیک مشـاهده شـد. نتایج پژوهش‌های فوق حـاکی از آن اســـت که کاربرد مقدار مطلوب ســـلنیم در محلول‌های غـذایی مورد اســـتفاده در هیدروپونیک تأثیر مثبتی بر شـــاخص‌های رشـدی و کاهش تجمع نیترات در محصـولات مختلف داشته است. با این وجود غلظت بهینه ســـلنیم در محلول غذایی برای کشـــت بدون خاک آن در محصـولات مختلف متفاوت بوده اسـت. با توجه به موارد فوق این پژوهش بـه منظور تعیین غلظـت بهینـه ســـلنیم در محلول غـذایی مورد اســـتفـاده برای تولیـد کـاهوی فرانســـوی قرمز که از بازارپسندی بالایی برخوردار است اجرا شد.

1- Electrolyte leakage

2- Blue baby syndrome

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت تیمار شامل غلظت‌های مختلف سلنیم در محلول غذایی در چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد روی کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا به‌صورت کشت هیدروپونیک بستر متخلخل انجام شد. غلظت‌های مختلف سلنیم محلول غذایی شامل صفر، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر بودند. با توجه به اثرات مثبت سلنات در افزایش متابولیسم نیترات و فعالیت آنزیم‌های مرتبط با آسیمیلاسیون نیترات (Bian *et al.*, 2020) و از طرف دیگر برتری سلنات نسبت به سلنیت در غنی‌سازی سلنیم با کاهو و بهبود رشد بخش هوایی آن (Ramos *et al.*, 2010) از سلنات سدیم ($Na_2SeO_4.2H_2O$) ساخت شرکت سیگما آلدریچ برای تهیه غلظت‌های مختلف سلنیم در محلول غذایی استفاده شد. به‌منظور اجرای آزمایش، بذرهای کاهو در ۱۶ آبان ۱۴۰۰ در سینی کشت نشاء حاوی کوکوپیت و پرلیت (با نسبت ۲ به ۱ حجمی) کاشته شده و روزانه توسط آب مقطر آبیاری شدند. پس از ظهور دو برگ اولیه، کود آبیاری نشاها با محلول غذایی یک چهارم قدرت دمینگوس و همکاران (Domingues *et al.*, 2012) تا روز ۱۴ بعد از کشت بذور انجام شد. به تدریج و با افزایش رشد نشاهای کاهو به ترتیب تا روز ۲۴ و ۳۶ روز بعد از کشت از محلول‌های غذایی یک دوم قدرت و سه چهارم قدرت استفاده شد. سپس ۳۶ روز پس از کشت (در مرحله پنج تا شش برگی)، نشاهای کاهو به گلدان‌های پلاستیکی ۱/۷ لیتری حاوی پرلیت (با اندازه ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر) منتقل شدند. برای هر واحد آزمایشی دو گلدان درنظر گرفته شده و در داخل هر گلدان یک بوته کشت شد (مجموعا ۵۶ گلدان). پس از انتقال نشاهای کاهو به گلدان‌ها از محلول غذایی کامل استفاده شد. همچنین اعمال تیمارهای سلنیم بلافاصله پس از انتقال نشاهای کاهو شروع شد. گلدان‌های آزمایشی در گلخانه با دمای ۳±۲۳ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰±۶۰ درصد بر روی سکو چیده شدند. برای تهیه محلول غذایی، از آب معمولی با pH ۷/۶، قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر، غلظت کاتیون‌های کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم به‌ترتیب ۱، ۰/۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۴ میلی‌اکی والان بر لیتر و غلظت آنیون‌های نیترات، بی‌کربنات و کلر به‌ترتیب ۰/۳۱، ۱/۵ و ۱ میلی‌اکی والان بر لیتر استفاده شد. بر مبنای شاخص‌های مناسب آب برای تهیه محلول غذایی (قابلیت هدایت الکتریکی کمتر از ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و غلظت سدیم و کلر کمتر از ۱/۵ میلی‌مول بر لیتر (Van-der-Lugt *et al.*, 2020) این آب در گروه مناسب برای تهیه محلول غذایی قرار گرفت. برای تهیه محلول غذایی از فرمولاسیون پیشنهادی دمینگوس و همکاران (Domingues *et al.*, 2012) با کمی تغییرات استفاده شد. در این فرمولاسیون غلظت نیتروژن نیترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد در محلول غذایی به‌ترتیب برابر با ۱۰/۵، ۰/۷، ۶/۲، ۳/۵، ۱/۴ و ۱/۴ میلی‌مولار و غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، منگنز، روی، مس، مولیبدن و بور به‌ترتیب برابر ۶۲/۵، ۶/۳۶، ۰/۵۴، ۰/۲۲، ۰/۰۷ و ۳۲/۴ میکرومولار بود. با لحاظ کردن غلظت عناصر غذایی موجود در آب، محاسبات لازم برای حصول به غلظت‌های مورد نظر در محلول‌های غذایی مورد استفاده انجام شد. همچنین pH محلول‌های غذایی با استفاده از محلول یک مولار اسید سولفوریک روی ۵/۴ تنظیم شد. سپس قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی تهیه شده با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد. قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی در محدوده ۱/۳۶ تا ۱/۴۱ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت. محلول غذایی روزانه و به‌صورت دستی به گیاهان اضافه شد. نوع سامانه هیدروپونیک مورد استفاده از نوع باز بود و کسر آبشویی بسته به مرحله رشد گیاه بین ۱۰ تا ۱۲ درصد در نظر گرفته شد تا از تجمع نمک‌ها در بستر جلوگیری شود. سپس مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره داشت در گلخانه تا زمان برداشت صورت گرفته و ۳۳ روز پس از انتقال نشا، بوته‌های کاهو برداشت شدند. پس از برداشت، بوته‌ها به دو بخش شاخساره و ریشه تقسیم شده و وزن تازه آن‌ها توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. یک بوته برای اندازه‌گیری خصوصیات ظاهری گیاه شامل ارتفاع گیاه، قطر گیاه، حداکثر طول و عرض برگ، تعداد برگ، شاخص سبزینگی برگ و غلظت نیترات اختصاص داده شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع، خط‌کش از محل برش بوته تا کنار بلندترین برگ در هر بوته قرار داده شده و ارتفاع اندازه‌گیری شد. برای اندازه گیری قطر بوته نیز ابتدا محیط بوته در قسمت بالایی آن با استفاده از متر اندازه‌گیری شده و سپس قطر بوته محاسبه شد. حداکثر طول و عرض برگ نیز با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. سبزینگی برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج Hansatech مدل CL-01 اندازه‌گیری شد. بدین منظور برای هر واحد آزمایشی ۱۰ قرائت از برگ‌های مختلف انجام شد و سپس میانگین آن‌ها به‌عنوان شاخص میزان کلروفیل آن واحد در نظر گرفته شد. نمونه‌های ریشه و شاخساره کاهو به‌مدت ۷۲ ساعت در آون فن‌دار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس نمونه‌ها آسیاب شده و پس از هضم تر با اسید نیتریک ۶۵ درصد و آب اکسیژنه ۳۰ درصد (Maneetong *et al.*, 2013)، غلظت سلنیم نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ICP اندازه‌گیری شد (Kapolna & Fodor, 2006; Maneetong *et al.*, 2013). لازم به ذکر است در تیمار با غلظت صفر سلنیم (شاهد) در محلول غذایی غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو غیرقابل تشخیص بود (حد قابل تشخیص دستگاه ۶ میکروگرم بر لیتر بود) که در نتیجه برای مقادیر سلنیم ریشه و شاخساره در این تیمار عدد صفر منظور شد. برای اندازه‌گیری غلظت نیترات یکی از گیاهان به دو بخش برگ‌های بیرونی (پیرتر، برگ‌های شماره ۱ تا ۱۰) و برگ‌های درونی (جوان‌تر، برگ‌های شماره ۱۱ به

بعد) تقسیم شد (Marsic & Osvald, 2002). سپس غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی به روش سولفوسالیسیلیک اسید و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Cataldo *et al*., 1975). غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو با استفاده از میانگین وزنی غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد محلول برگ (درجه بریکس) در یکی دیگر از گیاهان برداشت شده، تعداد ۳ برگ بیرونی (پیرتر) و ۳ برگ درونی (جوان‌تر) در هاون خرد شدند. سپس عصاره مخلوط خرد شده تهیه و میزان کل مواد محلول برگ با دستگاه رفراکتومتر مدل Atago اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله توسط نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹ تجزیه شده و برای مقایسه میانگین ها از آزمون حداقل تفاوت معنادار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر کاهو در سطح پنج درصد آماری معنادار شد. در حالی‌که اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر طول و عرض برگ و تعداد کل برگ کاهو معنادار نشد (جدول ۱). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم تا غلظت ۵ میکرومول بر لیتر تأثیر معناداری بر ارتفاع بوته کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم نداشت. اما کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به کاهش معنادار ارتفاع بوته در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد که البته تفاوت معناداری با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم نداشت. بیشترین میزان ارتفاع بوته (۱۲/۱سانتی‌متر) با کاربرد ۰/۱ میکرومول بر لیتر سلنیم و کمترین ارتفاع بوته (۱۰/۲ سانتی‌متر) با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد (جدول ۲).

نتایج نشان داد مصرف سلنیم در غلظت‌های کم، باعث افزایش قطر بوته کاهو شد، به‌طوری‌که کمترین قطر بوته (۲۰/۹ سانتی‌متر) با عدم کاربرد سلنیم و بیشترین قطر بوته (۲۴/۸ سانتی‌متر) با کاربرد ۱ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. اما با افزایش بیشتر سلنیم قطر بوته کاهش یافت. به‌طوری‌که با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم قطر بوته به‌طور معناداری در مقایسه با کاربرد ۱ میکرومول بر لیتر سلنیم کاهش یافت. با این وجود تفاوت معناداری از لحاظ قطر بوته بین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده نشد (جدول ۲). همچنین، طول و عرض برگ کاهو و تعداد برگ تحت تأثیر کاربرد سلنیم قرار نگرفتند (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر گیاه، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو

Table 1- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	قطر گیاه Plant diameter	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	تعداد برگ Leaf number
غلظت سلنیم Selenium concentration	6	1.74*	5.86*	0.32^{ns}	0.50^{ns}	6.75^{ns}
خطا Error	21	0.47	2.02	0.58	0.87	4.79
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		6.2	6.2	5.6	6.6	10.7

^{ns} غیر معنادار، * معنادار در سطح ۵ درصد

^{ns} Non significant, * significant at 5%

جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر ارتفاع و قطر گیاه، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو

Table 2- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

غلظت سلنیم Selenium concentration (μmol L^{-1})	ارتفاع گیاه Plant height	قطر گیاه Plant diameter	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	تعداد برگ Leaf number
	(cm)				
0	11.3^{abc}	20.9^{c}	13.7	13.5	18.7
0.1	12.1^{a}	22.6^{bc}	13.5	14.2	20.8
0.5	10.8^{bcd}	22.5^{bc}	13.7	14.2	20.3
1	11.4^{ab}	24.8^{a}	14.3	14.7	22.8
5	10.9^{bcd}	23.5^{ab}	13.6	14.4	20.8
10	10.2^{d}	22.2^{bc}	13.4	14.3	19.3
20	10.3^{cd}	23.3^{ab}	13.6	14.1	21.0

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

ارتفاع گیاهان تحت تأثیر خصوصیات ژنتیکی و شرایط محیطی نظیر رطوبت، کمیت و کیفیت نور و تغذیه قرار می‌گیرد. بر مبنای نتایج این پژوهش کاربرد سلنیم با غلظت ۱۰ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار ارتفاع بوته در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. همچنین اگر چه قطر بوته با افزایش غلظت سلنیم محلول غذایی افزایش یافت اما افزایش بیشتر سلنیم منجر به کاهش قطر بوته در غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. سلنیم در غلظت‌های کم می‌تواند بر سنتز کلروفیل و فتوسنتز تأثیر مثبت داشته باشد و در نتیجه منجر به افزایش ارتفاع و وزن گیاه شود. پنانن و همکاران (Pennanen *et al.*, 2002) نشان دادند که تیمار سلنیم موجب افزایش رشد بخش هوایی گیاهان می‌شود. غلظت‌های کم سلنیم با افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، تثبیت کربن و همچنین سنتز و هیدرولیز نشاسته و ساکارز موجب افزایش رشد گیاه می‌شود. اما کاربرد سلنیم در سطوح زیاد موجب کاهش کلروفیل و سنتز کربوهیدرات‌ها و متعاقب آن کاهش رشد گیاه می‌شود (Sun *et al.*, 2010) سمیت غلظت‌های زیاد سلنیم عمدتاً با جایگزینی غیراختصاصی اسیدهای آمینه گوگردی توسط آنالوگهای سلنیم مرتبط است. سلنیم در واکنش‌های مختلف در گیاهان جایگزین گوگرد می‌شود. گوگرد جزو ساختار اسیدهای آمینه‌ی پروتئینی از جمله سیستئین و متیونین بوده که این اسیدهای آمینه نقش کلیدی در رشد گیاه دارند. این اثر ممکن است ناشی از اختلال در تعادل عناصر غذایی نیز باشد (Hawrylak-Nowak, 2008a). بر مبنای نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد کاربرد سلنیم در مقادیر بیشتر از ۱۰ میکرومول بر لیتر، احتمالا منجر به بروز اثرات سمی آن شده است. در همین زمینه شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 2010) عنوان کردند با افزایش غلظت سلنیم ارتفاع گیاه، تعداد برگ و میزان ماده خشک کلزا در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم کاهش یافت. همچنین بذل و همکاران (Bazl *et al.*, 2017) در بررسی تأثیر سولفات و سلنیم بر برخی شاخص‌های رشدی پیاز عنوان کردند در تمامی غلظت‌های سولفات همزمان با افزایش غلظت سلنات ارتفاع بلندترین برگ کاهش یافت. بر مبنای نتایج این پژوهش هیچ کدام از شاخص‌های رویشی دیگر از قبیل تعداد برگ، طول و عرض برگ تحت تأثیر کاربرد سلنیم قرار نگرفتند. همسو با نتایج این پژوهش، لانگ‌چمپ و همکاران (Longchamp *et al.*, 2013) در کشت هیدروپونیک ذرت گزارش کردند کاربرد سلنیم بر میزان سطح برگ تأثیری نداشته است.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزینگی و کل مواد جامد محلول برگ کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزینگی و کل مواد جامد محلول برگ کاهو به ترتیب در سطوح یک و پنج درصد آماری معنادار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد با افزایش غلظت سلنیم شاخص سبزینگی برگ کاهو افزایش یافت. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۱ و ۵ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار شاخص سبزینگی برگ کاهو نسبت به عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد. کاربرد سایر سطوح سلنیم (۰/۱، ۰/۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر) تفاوت معناداری با عدم کاربرد سلنیم از نظر شاخص سبزینگی برگ ایجاد نکردند. نتایج نشان داد کمترین شاخص سبزینگی برگ (۲/۵۸) با کاربرد ۰/۱ میکرومول بر لیتر سلنیم و بیشترین شاخص سبزینگی برگ (۳/۹۵) با کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزینگی برگ، کل مواد جامد محلول برگ، وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

Table 3- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on leaf chlorophyll index, leaf total soluble solids, root and shoot fresh weights of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	شاخص سبزینگی برگ Leaf chlorophyll index	کل مواد جامد محلول برگ Leaf total soluble solids	وزن تازه ریشه Root fresh weigh	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weigh
غلظت سلنیم Selenium concentration	6	1.14**	0.61*	1.09ns	236.5*
خطا Error	21	0.22	0.22	4.04	86.0
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		13.7	13.0	15.8	8.0

ns غیر معنادار، * معنادار در سطح ۵ درصد، ** معنادار در سطح ۱ درصد

ns Non significant, * significant at 5%, ** significant at 1%

جدول ۴- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر شاخص سبزینگی برگ، کل مواد جامد محلول برگ، وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

Table 4- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on leaf chlorophyll index, leaf total soluble solids, root and shoot fresh weights of lettuce

غلظت سلنیم Selenium concentration (μmol L^{-1})	شاخص سبزینگی برگ Leaf chlorophyll index	کل مواد جامد محلول برگ Leaf total soluble solids	وزن تازه ریشه Root fresh weigh (g $plant^{-1}$)	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weigh (g $plant^{-1}$)
0	3.21[bcd]	3.20[c]	12.5	104.5[c]
0.1	2.58[d]	3.33[bc]	12.3	115.9[abc]
0.5	2.88[dc]	3.80[abc]	13.2	111.3[bc]
1	3.95[a]	3.43[bc]	12.4	127.2[a]
5	3.92[a]	4.23[a]	13.6	117.5[abc]
10	3.85[ab]	3.30[bc]	13.0	114.4[abc]
20	3.53[abc]	3.95[ab]	12.4	124.5[ab]

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

اندازه‌گیری شاخص سبزینگی برگ روشی غیرمخرب برای برآورد میزان کلروفیل برگ است. میزان کلروفیل برگ از معیارهای مهمی است که به‌عنوان شاخص فعالیت فتوسنتزی در کشاورزی به‌کار می‌رود. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش غلظت سلنیم تا یک میلی‌مول بر لیتر شاخص سبزینگی برگ افزایش و کاربرد مقادیر بیشتر سلنیم منجر به کاهش این شاخص شد. سلنیم اثر دوگانه بر رشد و نمو گیاهان بسته به شکل و مقدار کاربرد آن دارد. افزودن سلنیم در غلظت‌های کم به محیط می‌تواند اثرات مفیدی بر رشد گیاه و ظرفیت آنتی‌اکسیدانتی آن داشته باشد. نتایج پژوهش‌های انجام شده حاکی از اثر افزایشی غلظت‌های کم سلنیم بر محتوای کلروفیل گیاهان است (Pennanen *et al.*, 2002). خادمی آستانه و همکاران (Khademi Astaneh *et al.*, 2015) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم در محلول غذایی در کشت هیدروپونیک کلم تکمه‌ای گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم تا ۸ میلی‌گرم بر لیتر شاخص سبزینگی برگ‌ها افزایش و کاربرد مقادیر بیشتر منجر به کاهش این شاخص شد. افزایش میزان کلروفیل احتمالا به‌دلیل دخالت سلنیم در مسیر بیوسنتز کلروفیل به‌ویژه در نتیجه برهمکنش سلنیم با آنزیم‌های حاوی گروه سولفیدریل است. به‌نظر می‌رسد نقش حفاظتی این عنصر در گیاهان به‌ویژه حفاظت سلنیم از مراکز فتوشیمیایی برگ‌ها دلیل دیگر افزایش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاه در حضور سلنیم می‌باشد (Hajiboland & Keivanfar, 2012). همچنین سلنیم به‌طور قابل توجهی میزان کلروفیل را افزایش داده که این افزایش در کل محتوای کلروفیل می‌تواند در افزایش میزان کارتنوئیدها مؤثر باشد. دلیل این مسئله آن است که کارتنوئیدها، کلروفیل را از تخریب اکسیداسیون نوری حفاظت می‌کنند (Jalali & Salehi Chegeni, 2020). تأثیر سلنیم بر افزایش مقدار کلروفیل a، b و کل در دیگر پژوهش‌های انجام شده (Hawrylak-Noawk, 2008b; Chen *et al.*, 2008) نیز گزارش شده است که در مطابقت با نتایج این پژوهش است. البته گزارش‌هایی نیز در مورد تأثیر منفی غلظت‌های زیاد سلنیم بر مقدار کلروفیل و فتوسنتز گیاه وجود دارد. به‌طوری‌که گزارش‌ها حاکی از کاهش محتوای کلروفیل گیاه تحت تأثیر غلظت‌های زیاد سلنیم بوده است (Hawrylak *et al.*, 2007). از آنجایی‌که کاهو برای تهیه سالاد استفاده می‌شود افزایش شاخص سبزینگی برگ در آن اهمیت زیادی دارد. زیرا رنگ تیره‌تر کاهو توسط مصرف‌کنندگان ترجیح داده می‌شود (Manzocco *et al.*, 2011). بنابراین مصرف مقادیر مناسب سلنیم می‌تواند در بازارپسندی این محصول نقش زیادی داشته باشد.

مقدار کل مواد جامد محلول برگ (درجه بریکس) معیاری برای تعیین میزان قندهای محلول است که افزایش آن در بهبود کیفی کاهو مؤثر است. نتایج نشان داد افزایش غلظت سلنیم منجر به افزایش معنادار میزان کل مواد جامد محلول برگ شد. به‌طوری‌که کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۵ و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار میزان کل مواد جامد محلول برگ در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. در این میان با کاربرد غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم تفاوت معناداری در میزان کل مواد جامد محلول برگ نسبت به عدم کاربرد سلنیم مشاهده نشد. بیشترین میزان کل مواد جامد محلول برگ (۴/۲۳) با کاربرد ۵ میکرومول بر لیتر سلنیم و کمترین آن (۳/۲۰) با عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد (جدول ۴). کاربرد مقادیر کم سلنیم احتمالا از طریق افزایش میزان کلروفیل و متعاقب آن میزان فتوسنتز و تثبیت کربن، تجمع نشاسته در کلروپلاست‌ها را افزایش داده است (Sun *et al.*, 2011). مالیک و همکاران (Malik *et al.*, 2010) نشان دادند احتمالا سلنیم با فراتنظیمی آنزیم‌های دخیل در سنتز و هیدرولیز ساکارز (اینورتاز، ساکارز سنتتاز و ساکارز فسفات سنتتاز) و آنزیم‌های هیدرولیز کننده نشاسته (آمیلازها) میزان تولید نشاسته و ساکارز را در گیاه افزایش داده است.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر وزن تازه ریشه کاهو معنادار نشد. در حالی‌که اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر وزن تازه شاخساره کاهو در سطح پنج درصد آماری معنادار شد (جدول ۳). کاربرد یک میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو (۱۲۷/۲ گرم بر گیاه) شد. وزن تازه شاخساره گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم ۲۲ درصد افزایش یافت. همچنین کاربرد سلنیم با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر نیز منجر به افزایش معنادار وزن تازه شاخساره کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد اگرچه تفاوت معناداری از نظر وزن تازه شاخساره بین غلظت‌های یک و ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده نشد. کمترین وزن تازه شاخساره (۱۰۴/۵ گرم بر گیاه) در تیمار شاهد مشاهده شد. اما تفاوت معناداری از نظر وزن تازه شاخساره کاهو بین گیاهان تغذیه شده با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول سلنیم بر لیتر محلول غذایی مشاهده نشد (جدول ۴). بر مبنای نتایج این پژوهش، کاربرد سلنیم با غلظت‌های یک و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنی‌دار وزن تازه شاخساره کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند کاربرد سلنیم در غلظت‌های پایین اثر مثبتی بر رشد محصول و تحمل تنش دارد، اگرچه نقش این عنصر هنوز به‌عنوان یک عنصر کم‌مصرف ضروری در گیاهان عالی تأیید نشده است. تأثیر مثبت سلنیم بر افزایش عملکرد گیاهان از طریق راهکارهای مختلفی است. سلنیم از طریق افزایش محتوای کلروفیل برگ‌ها و کاهش نشت الکترولیت از آنها منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود. با افزایش سنتز کلروفیل میزان فتوسنتز و تثبیت کربن در گیاه افزایش یافته که این امر در نهایت منجر به افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Khademi Astaneh *et al.*, 2015). از طرف دیگر سلنیم با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات فنلی گیاه بر بهبود عملکرد آن مؤثر است (Amerian *et al.*, 2018). صفاریزدی و همکاران (Saffar Yazdi *et al.*, 2012) گزارش کردند تأثیر مثبت سلنیم بر وزن تازه گیاه اسفناج بدلیل تأثیر این عنصر بر سنتز کلروفیل، تثبیت کربن، سنتز و هیدرولیز نشاسته و تحریک تقسیم سلولی است. البته افزایش وزن تازه شاخساره ممکن است به نقش تنظیم‌کنندگی ترکیبات سلنیمی در مدیریت آب و افزایش آب بافت گیاه نیز ارتباط داشته باشد (Hawrylak *et al.*, 2007). تأثیر مثبت سلنیم بر افزایش عملکرد گیاه در کلم تکمه‌ای (Khademi Astaneh *et al.*, 2015)، اسفناج (Saffar Yazdi *et al.*, 2012)، پیاز (Amerian *et al.*, 2018; Bazl *et al.*, 2017) نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همسو می‌باشد. اما افزایش بیشتر غلظت سلنیم می‌تواند باعث کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه شده و در نهایت منجر به کاهش زیست‌توده یا حتی مرگ گیاه شود (Hawrylak-Nowak, 2013) که این امر در گیاهان مختلف از جمله ذرت و لوبیا (Sun *et al.*, 2011) نیز مشاهده شده است.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو در سطح آماری یک درصد معنادار بود (جدول ۵). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم منجر به افزایش معنادار غلظت سلنیم ریشه و شاخساره کاهو شد. کاربرد سلنیم تا غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش غلظت سلنیم ریشه شد اما این افزایش از لحاظ آماری معنادار نبود. در این میان تفاوت معناداری از نظر غلظت سلنیم ریشه بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و یک میکرومول بر لیتر دیده نشد. اما با افزایش بیشتر غلظت سلنیم تا ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم ریشه به‌طور معناداری افزایش یافت. به‌طوری‌که کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سلنیم منجر به بیشترین غلظت سلنیم ریشه کاهو (۳۵/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شد. غلظت سلنیم ریشه گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم به‌ترتیب ۳/۸ و ۲/۱ برابر افزایش یافت. اما در تیمار عدم کاربرد سلنیم در محلول غذایی، غلظت سلنیم ریشه قابل تشخیص با دستگاه ICP نبود (جدول ۶). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم تا غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش غلظت سلنیم شاخساره شد اما این افزایش از لحاظ آماری معنادار نبود. در این میان تفاوت معناداری از نظر غلظت سلنیم شاخساره بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و یک میکرومول بر لیتر دیده نشد. اما با افزایش بیشتر غلظت سلنیم تا ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم شاخساره به‌طور معناداری افزایش یافت. به‌طوری‌که کاربرد سلنیم با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به بیشترین غلظت سلنیم شاخساره کاهو (۱۵/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شد. غلظت سلنیم شاخساره گیاهان کاهوی تغذیه شده با این میزان سلنیم در مقایسه با غلظت‌های ۵ و ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم به‌ترتیب ۴/۴ و ۲ برابر افزایش یافت. مشابه ریشه در تیمار عدم کاربرد سلنیم غلظت سلنیم شاخساره کاهو قابل تشخیص با دستگاه ICP نبود (جدول ۶).

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره و غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 5- Variance analysis (mean square) for the effect of selenium concentration in the nutrient solution on root and shoot selenium concentrations and nitrate concentration in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	سلنیم ریشه Root selenium	سلنیم شاخساره Shoot selenium	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Nitrate of all leaves
غلظت سلنیم Selenium concentration	6	697.8**	125.4**	199454*	603128**	194112**	447676**
خطا Error	21	3.55	0.29	33058	54033	14006	25504
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		20.4	13.9	8.6	7.6	6.7	6.4

* معنادار در سطح ۵ درصد، ** معنادار در سطح ۱ درصد

* Significant at 5%, * significant at 1%

نتـایج پژوهش‌هـای انجام شـــده در گیاهان مختلف حاکی از آن اســت که با کاربرد ســلنیم در محیط، غلظت آن در گیاه افزایش یافته اســت. در همین زمینـه خـادمی آســتـانه و همکاران (Khademi Astaneh et al., 2015) در بررســی تأثیر کاربرد ســلنیم در محلول غذایی در کشــت هیدروپونیک کلم تکمه‌ای گزارش کردند با افزایش مصرف سلنیم، غلظت سلنیم در برگ‌های پیر بیشتر از برگ‌های جوان و در برگ‌هـای جوان بیشـــتر از جوانـه‌هـا افزایش یـافت. راموس و همکاران (Ramos et al., 2010) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم از دو شـکل سـلنات و سـلنیت بر رشد کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک گزارش کردند با افزایش غلظت سلنیم در محلول غذایی غلظت آن در برگ کـاهو افزایش یـافت. هائیرلاک-نواک (Hawrylak-Nowak, 2013) در بررسی اثرات غلظت‌های مختلف سلنیت و سلنات بر تجمع سلنیم در کاهو در شرایط هیدروپونیک گزارش دادند که در قسمت‌های خوراکی کاهو، غلظت سـلنیم با کاربرد سـلنات در مقایسـه با سـلنیت بیشـتر بود و در مورد ریشـه‌ها کاربرد سـلنیت باعث تجمع زیاد سلنیم گردید. منیتونگ و همکاران (Maneetong et al., 2013) در بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف سـلنیم در محلول غذایی بر تجمع سـلنیم در کلم پیچ قمری در سیسـتم کشت هیدروپونیک گزارش کردند غلظت کل سـلنیم در گیاه، در تمام تیمارهای حاوی سـلنیم بیشـتر از تیمار شاهد بود. نتایج مشابهی توسط بذل و همکاران (Bazl et al., 2017) در پیاز قرمز آذرشـــهر، لی و همکاران (Lee et al., 2001) در نعناع کره‌ای، مالورگیو و همکاران (Malorgio et al., 2009) در گیاهان شـیکوره و کاهو و لانگ‌چمپ و همکاران (Longchamp et al., 2013) در ذرت گزارش شـده اسـت. نتایج این پژوهش نشـان داد که حداکثر غلظت سـلنیم در شـاخسـاره با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سـلنیم به میزان ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک مشاهده شد که این عدد در محدوده غلظت ذکر شـده برای غلظت سلنیم در شاخساره کاهو با کاربرد همین مقدار سلنیم توسط ریوس و همکاران (Rios et al., 2008) بود. اما از غلظت ذکر شـده توسـط راموس و همکاران (Ramos et al., 2010) در کاهو بیشتر بود. آنها ذکر کردند با کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت ۳۲ میکرومول بر لیتر غلظت سلنیم شـاخسـاره کاهو به حدود ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک رسید. به‌نظر می‌رسـد این تفاوت نشـان‌دهنده جذب بهتر سـلنیم در شـرایط پژوهش حاضـر بوده اسـت. بر مبنای حد سمیت سلنیم در گیاهان که بیش از ۰/۱ درصـد بر مبنای وزن خشـک اسـت (Tomasi et al., 2015) کاربرد سـلنیم در محلول غذایی حتی با غلظت ۲۰ میکرومول بر لیتر نیز منجر به تجمع مقادیر سـمی این عنصـر در کاهو نشـد. بر مبنای توصـیه وزارت کشـاورزی ایالات متحده امریکا میزان توصـیه شـده سـلنیم برای بزرگسالان ۵۰ تا ۷۰ میکروگرم در روز است (US Department of Agriculture, 2001). بر مبنای محاسـبات این تحقیق و بر اسـاس درصد ماده خشک شاخساره کاهوی تولید شده در این پژوهش (۵/۵ درصد) و با توجه به این که غلظت سلنیم شاخساره کاهو با کاربرد ۲۰ میکرومول بر لیتر سـلنیم در محلول غذایی حدود ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مـاده خشـک بود هر کیلوگرم کـاهوی تازه حاوی ۸۲۵ میکروگرم سـلنیم اسـت که مصرف روزانه ۸۰ گرم از این کاهو می‌تواند نیاز روزانه یک فرد بزرگسال را به این عنصر تامین کند (محاسـبات با فرض نیاز روزانه ۶۶ میکروگرم در روز سلنیم برای یک فرد بزرگسـال انجام شـده اسـت). بنابراین به راحتی می‌توان با تولید کاهوی غنی شده با سلنیم نیاز بدن انسان را به این عنصر تأمین کرد. برمبنای نتایج این پژوهش و با توجه به گسـترش کمبود سـلنیم در جوامع انسـانی، اسـتفاده از این عنصـر در محلول غذایی مورد استفاده برای پرورش کاهو در غنی‌سازی این محصـول با سلنیم و تأمین نیاز روزانه بدن انسان به این عنصر مفید است.

جدول ۶- مقایسه میانگین تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت سلنیم ریشه و شاخساره (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) و غلظت نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 6- Mean comparisons of the effect of selenium concentration in the nutrient solution on root and shoot selenium concentrations (mg kg^{-1} dry weight) and nitrate concentration (mg kg^{-1} fresh weight) in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

غلظت سلنیم Selenium concentration (μmol L^{-1})	سلنیم ریشه Root selenium	سلنیم شاخساره Shoot selenium	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Nitrate of all leaves
0	0^{d}	0^{d}	2243^{ab}	3571^{a}	2032^{a}	2918^{a}
0.1	0.27^{d}	0.26^{d}	2098^{b}	3112^{b}	1731^{c}	2527^{b}
0.5	0.87^{d}	0.42^{d}	2162^{ab}	2478^{c}	1697^{c}	2095^{d}
1	1.63^{d}	0.62^{d}	2427^{a}	3547^{a}	1999^{ab}	2934^{a}
5	9.36^{c}	3.42^{c}	1688^{c}	3055^{b}	1678^{c}	2363^{bc}
10	16.99^{b}	7.44^{b}	2103^{b}	2889^{b}	1384^{d}	2170^{cd}
20	35.56^{a}	15.04^{a}	2132^{b}	2867^{b}	1844^{bc}	2365^{bc}

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنادار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

تأثیر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت نیترات ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر غلظت سلنیم محلول غذایی بر غلظت نیترات ریشه کاهو در سطح پنج درصد آماری و بر غلظت نیترات برگ‌های بیرونی، درونی و همچنین کل برگ‌های کاهو در سطح یک درصد آماری معنادار شد (جدول ۵). نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت ۵ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات ریشه در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کاربرد سلنیم با غلظت ۵ میکرمول بر لیتر غلظت نیترات ریشه را ۲۵ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد. اما بین کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر و عدم کاربرد سلنیم تفاوت معناداری از نظر غلظت نیترات ریشه مشاهده نشد. کمترین غلظت نیترات ریشه با کاربرد ۵ میکرومول بر لیتر سلنیم (۱۶۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) مشاهده شد (جدول ۶). بر مبنای نتایج حاصله کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی (۲۴۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های بیرونی را به‌ترتیب ۱۳، ۳۱، ۱۴، ۱۹ و ۲۰ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶). به‌طور مشابه کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در برگ‌های درونی کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های درونی (۱۳۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۱۰ میکرومول بر لیتر سلنیم و بیشترین آن (۲۰۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) در تیمار عدم کاربرد سلنیم مشاهده شد. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های درونی را به‌ترتیب ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۳۲ و ۹ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶). نتایج اثر کاربرد سطوح مختلف سلنیم بر غلظت نیترات کل برگ‌های کاهو نشان داد کاربرد سلنیم به استثنای غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به کاهش معنادار غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. کمترین غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو (۲۰۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم مشاهده شد. نتایج نشان داد کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر میزان نیترات برگ‌های درونی را به‌ترتیب ۱۳، ۲۸، ۱۹، ۲۶ و ۱۹ درصد نسبت به عدم کاربرد سلنیم کاهش داد (جدول ۶).

کاهش غلظت نیترات در بخش‌های مختلف کاهو در نتیجه کاربرد سلنیم دلایل مختلفی دارد. ریوس و همکاران (Rios *et al.*, 2010) عنوان کردند کاهش غلظت نیترات پس از کاربرد سلنیم ممکن است به دو دلیل باشد. نخست، اثر منفی سلنیم بر ناقلین غشا است. البته کاهش غلظت نیترات توسط سلنیم ممکن است به‌علت اثر آنتاگونیستی بین این دو آنیون نیز باشد. دلیل دوم می‌تواند القای آسیمیلاسیون نیترات توسط افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز باشد که توسط سلنیم تحریک می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که در شرایط کاربرد سلنیم علاوه بر افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، نیاز گیاهان به ترکیبات نیتروژنه نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت، افزایش متابولیسم گوگرد در گیاهان می‌تواند نتیجه کاربرد سلنیم باشد. افزایش آسیمیلاسیون گوگرد تحت این شرایط در نتیجه نیاز گیاهان به ترکیبات آلی نیتروژنه است که با افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط

با آسیمیلاسیون نیتروژن همراه است. در پژوهش‌های قبلی هم مشخص شد کاربرد سلنیم با تحریک و افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز باعث کاهش تجمع نیترات در جو (Aslam *et al.*, 1990) و آفتابگردان (Ruiz *et al.*, 2017) شد. یکی از عوامل اولیه تنظیم فعالیت نیترات ردوکتاز در گیاه، میزان نیترات است. حضور نیترات میزان mRNA نیترات ردوکتاز را افزایش داده و باعث تحریک سنتز این آنزیم می‌شود. نیترات در سیتوپلاسم سلول‌ها از طریق آنزیم نیترات ردوکتاز به نیتریت تبدیل می‌شود و این اولین مرحله از مسیر متابولیکی آسیمیلاسیون نیترات در گیاهان است که با کمک این آنزیم انجام می‌گردد. در واقع سلنیم با کاهش فعالیت ناقلین نیترات و افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز منجر به کاهش غلظت نیترات برگ می‌شود (Rios *et al.*, 2010). از طرف دیگر سلنیم باعث کاهش انتقال نیترات از ریشه‌ها به برگ‌های کاهو شده و در نتیجه باعث کاهش تجمع نیترات در برگ‌های این گیاه می‌شود (Lei *et al.*, 2018). در مطابقت با نتایج این پژوهش لی و همکاران (Lei *et al.*, 2018) در بررسی تأثیر کاربرد سلنیم بر تجمع نیترات در گیاه کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک دریافتند کاربرد سلنیم به‌طور قابل توجهی سبب کاهش تجمع نیترات در کاهو در سیستم کشت هیدروپونیک شد و کمترین میزان تجمع نیترات تحت تأثیر غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر سلنیم از منبع سلنیت سدیم به‌دست آمد. همچنین استفاده از سلنیم سبب افزایش میزان فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، بازده تعرق و در نتیجه افزایش ظرفیت فتوسنتزی کاهو شد. علاوه بر این، سلنیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های موثر بر متابولیسم نیتروژن از جمله نیترات ردوکتاز، نیتریت ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتاز عملکرد مثبتی در کاهش تجمع نیترات در کاهو داشت. آنها بیان کردند کاربرد سلنیم منجر به کاهش تجمع نیترات در برگ‌های کاهو از طریق ۱- افزایش انتشار به خارج نیترات از ریشه‌ها، ۲- جلوگیری از انتقال نیترات از ریشه به برگ‌ها و ۳- القای آسیمیلاسیون نیترات شد. از طرف دیگر سلنیم قادر است جذب برخی از عناصر کم‌مصرف مثل مولیبدن که به‌عنوان یک کوفاکتور برای آنزیم نیترات ردوکتاز عمل می‌کند را تغییر دهد (Dordas & Sioulas, 2008). تأثیر مثبت کاربرد سلنیم بر کاهش تجمع نیترات در کاهو (Rios *et al.*, 2008, 2010; Ramos *et al.*, 2010; Lei *et al.*, 2018; Bian *et al.*, 2020)، اسفناج (Jalali & Salehi Chegeni, 2020) و کلم تکمه‌ای (Khademi Astaneh *et al.*, 2015) نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همسو می‌باشد. در مورد غلظت استاندارد نیترات در سبزی‌های برگی اتحادیه اروپا مقدار ۲۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه را به‌عنوان حد مجاز معرفی کرده است (Santamaria, 2006). بر اساس نتایج جدول ۶ غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و کل برگ‌های گیاهان تولید شده بدون کاربرد سلنیم در محلول غذایی بیشتر از ۲۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه بود. اما با کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و با کاربرد سلنیم با غلظت‌های ۰/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو به زیر حد بحرانی رسید. این مطلب نشاندهنده آن است که کاربرد سلنیم در محلول غذایی در کاهش غلظت نیترات شاخساره کاهو موثر است. این کاهش از لحاظ تغذیه‌ای دارای اهمیت زیادی بوده و مصرف این نوع کاهو خطری را برای سلامتی انسان از نظر غلظت نیترات ایجاد نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد سلنیم در محلول غذایی با غلظت یک میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار قطر کاهو، وزن تازه شاخساره و شاخص سبزینگی کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد سلنیم شد. اگرچه سایر شاخص‌های رشدی از قبیل تعداد کل برگ و طول و عرض برگ تحت تأثیر معنادار کاربرد سلنیم قرار نگرفتند. کاربرد سلنیم به‌خصوص در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میکرومول بر لیتر منجر به افزایش معنادار غلظت این عنصر در شاخساره کاهو شد که به لحاظ غنی‌سازی این محصول با سلنیم دارای اهمیت زیادی است. همچنین کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر منجر به کاهش تجمع نیترات در ریشه و شاخساره کاهو شد که از لحاظ سلامتی مصرف‌کننده دارای اهمیت زیادی است. براساس نتایج این پژوهش و با توجه به غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، کاربرد سلنیم با غلظت ۰/۵ میکرومول بر لیتر برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک توصیه می‌شود.

References

1. Amerian, M., Dashti, F., & Delshad, M. (2018). Effects of different levels of selenium and nitrogen on some growth and biochemical characteristics of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Journal of Plant Production Research*, *25*(1), 119-135. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/jopp.2018. 12032.2101
2. Aslam, M., Harbit, K.B., & Huffaker, R. (1990). Comparative effects of selenium and selenate on nitrate assimilation in barley seedlings. *Plant, Cell and Environment*, *13*(8), 773-782. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01093.x
3. Bazl, S., Dashti, F., & Delshad, M. (2017). Effects of different levels of sulfur and selenium on some morphological and antioxidant properties of onion (*Allium cepa* L.) cv. Germez Azarshahr. *Iranian Journal of Horticultural*

Science, *48*(3), 623-633. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijhs.2017.218315.1108
4. Bian, Z., Bo, L., Cheng, R., Yu, W., Tao, L., & Yang, Q. (2020). Selenium distribution and nitrate metabolism in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.): Effects of selenium forms and light spectra. *Journal of Integrative Agriculture*, *19*(1), 133-144. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62775-9
5. Cataldo, D., Maroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *6*(1), 71-80. https://doi.org/10.1080/00103627509366547
6. Chen, T.F., Zheng, W.J., Wong, Y.S., & Yang, F. (2008). Selenium-induced changes in activities of antioxidant enzymes and content of photosynthetic pigments in *Spirulina platensis*. *Journal of Integrative Plant Biology*, *50*(1), 40-48. https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00600.x
7. Domingues, D.S., Takahashi, H.W., Camara, C.A.P., & Nixdorf, S.L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, *84*(1), 53-61. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006
8. Dordas, C.A., & Sioulas, C. (2008). Safflower yield, chlorophyll content, photosynthesis, and water use efficiency response to nitrogen fertilization under rainfed conditions. *Industrial Crops and Products*, *27*(1), 75-85. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.020
9. Hajiboland, R., & Keivanfar, N., (2012). Selenium supplementation stimulates vegetative and reproductive growth in canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, *99*(1), 13-19. https://doi.org/10.14720/aas.2012.99.1.14515
10. Hawrylak-Nowak, B. (2008a). Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *Journal of Elementology*, *13*(4), 513-519.
11. Hawrylak-Noawk, B. (2008b). Enhanced selenium content in sweet basil (*Ocimum basilicum*) by foliar fertilization. *Vegetable Crops Research Bulletin*, *69*(1), 63-72. https://doi.org/10.2478/v10032-008-0021-4
12. Hawrylak-Nowak, B. (2013). Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regulation*, *70*(1), 149-157. https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5
13. Hawrylak, B., Matraszek, R., & Szymanska, M. (2007). Response of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to selenium in nutrient solution contaminated with nickel. *Vegetable Crops Research Bulletin*, *67*(1), 63-70. https://doi.org/10.2478/v10032-007-0031-7
14. Jalali, M., & Salehi Chegeni, N. (2020). The positive effect of selenium on nitrate accumulation in spinach (*Spinacia oleracea* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Horticultural Science*, *34*(2), 321-334. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i2.85540
15. Kapolna, E., & Fodor, P. (2006). Speciation analysis of selenium enriched green onions (*Allium fistulosum*). *Microchemical Journal*, *84*(1-2), 56-62. https://doi.org/10.1016/j.microc.2006.04.014
16. Khademi Astaneh, R., Tabatabaie, S.J., & Bolandnazar, S.A. (2015). The effect of different concentrations of Se on yield and physiological characteristics of brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. Gemmifera). *Journal of Horticultural Science*, *28*(4), 535-543. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.22780
17. Lee, M.J., Lee, G.P., & Park, K.W. (2001). Effects of selenium on growth and quality in hydroponically-grown Korean mint (*Agastache rugosa*). *Horticulture, Environment and Biotechnology*, *42*(5), 483-486.
18. Lei, B., Bian, Z.H., Yang, Q.C., Wang, J., Cheng, R.F., Li, K., Liu, W.K., Zhang, Y., Fang, H., & Tong, Y.X. (2018). The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, *17*(4), 837-846. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63784-X
19. Longchamp, M., Angeli, N., & Castrec-Rouelle, M. (2013). Selenium uptake in *Zea mays* supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions. *Plant and Soil*, *362*(1/2), 107-117. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1259-7
20. Malik, J.A., Kumar, S., Thakur, P., Sharma, S., Kau Raman Preet, N., Kaur, D.P., Bhandhari, K., Kaushal, N., Singh, K., Srivastav, A., & Nayyar, H. (2010). Promotion of growth in mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. *Biological Trace Element Research*, *143*(1), 530-539. https://doi.org/10.1007/s12011-010-8872-1
21. Malorgio, F., Diaz, K., & Ferrante, A. (2009). Effects of selenium addition on minimally processed leafy vegetables grown in a floating system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *89*(13), 2243–2251. https://doi.org/10.1002/jsfa.3714
22. Maneetong, S., Chookhampaeng, S., Chantiratikul, A., Chinrasri, O., Thosaikham, W., Sittipout, R., & Chantiratikul, P. (2013). Hydroponic cultivation of selenium-enriched kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra* L.) seedling and speciation of selenium with HPLC–ICP-MS. *Microchemical Journal*, *108*(1), 87-91. https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.01.003
23. Manzocco, L., Foschia, M., Tomasi, N., Maifreni, M., Dalla-Costa, L., Marino, M., Cortella, G., & Cesco, S. (2011). Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella*

locusta L. *Laterr*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *91*(8), 1373-1380. https://doi.org/10.1002/jsfa.4313

24. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
25. Marsic, N.K., & Osvald, J. (2002). Effects of different nitrogen levels on lettuce growth and nitrate accumulation in iceberg lettuce (*Lactuca sativa* var. *Capitata*) grown hydroponically under greenhouse conditions. *Gartenbauwissenschaft*, *67*(4), 128-134.
26. Pennanen, A., Xue, T.L., & Hartikainen, H. (2002). Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal of Applied Botany*, *76*(1-2), 66-76.
27. Ramos, S., Faquin, V., Guilherme, L., Castro, E., Ávila, F., Carvalho, G., Bastos, C., & Oliveira, C. (2010). Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant, Soil and Environment*, *56*(12), 584-588. https://doi.org/10.17221/113/2010-PSE
28. Rios, J.J., Blasco, B., Cervilla, L.M., Rosales, M.A., Sanchez-Rodriguez, E., Romero, L., & Ruiz, J.M. (2010). Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*(11), 1914-1919. https://doi.org/10.1002/jsfa.4032
29. Rios, J.J, Rosales, M.A., Blasco, B., Cervilla, L.M., Romero, L., & Ruiz, J.M. (2008). Biofortification of Se and induction of the antioxidant capacity in lettuce plants. *Scientia Horticulturae*, *116*(3), 248-255. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.01.008
30. Risch H.A., Jain M., Choi N.W., Fodor J.G., Pfeiffer C.J., Howe G.R., Harrison L.W., Craib K.J.P., & Miller A.B. (1985). Dietary factors and the incidence of cancer of the stomach. *American Journal of Epidemiology*, *122*(6), 947-949. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114199
31. Ruiz, J.M., Rivero, R.M., & Romero, L. (2017). Comparative effect of Al, Se, and Mo toxicity on NO_3^- assimilation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *Journal of Environmental Management*, *83*(2), 207-212. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.001
32. Saffar Yazdi, A., Lahouti, M., & Ganjeali, A. (2012). The effects of different selenium concentrations on some morpho-physiological characteristics of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Horticultural Science*, *26*(3), 292-300. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.15211
33. Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *86*(1), 10-17. https://doi.org/10.1002/jsfa.2351
34. Sharma, S., Bansal, A., Dhillon, S.K., & Dhillon, K.S. (2010). Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, *329*(1-2), 339-348. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0162-3
35. Tomasi, N., Pinton, R., Gottardi, S., Mimmo, T., Scampicchio, M., & Cesco, S. (2015). Selenium fortification of hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta*). *Crop and Pasture Science*, *66*(11), 1128–1136. https://doi.org/10.1071/CP14218
36. Sun, H.W., Ha, J., Liang, S.X., & Kang, W.J. (2010). Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *41*(10), 1195-1204. https://doi.org/10.1080/00103621003721395
37. US Department of Agriculture. (2001). Dietary reference intakes: elements. Available at http://www.iom.edu/Global/News Announcements/~/media/48FAAA2FD9E74D95BBDA2236E7387B49.ashx
38. Van-der-Lugt, G., Holwerda, H.T., Hora, K., Bugter, M., Hardeman, J., & deVries, P. (2020). Nutrient Solutions for Greenhouse Crops. *Geerten*, *4*, 1-98.